

# 湍流边界层空间特征尺度的层析 TRPIV 测量

杨绍琼<sup>2</sup> 姜楠<sup>123</sup>

7. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080

8. 天津大学机械工程学院力学系, 天津 300072

9. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072

**摘要:** 利用层析 TRPIV 测量得到的平板湍流边界层速度场数据库, 计算得到了平板湍流边界层空间耗散尺度、剪切尺度、泰勒微分尺度、积分尺度等典型特征尺度, 并研究了这些空间特征尺度随平板湍流边界层法向位置的变化规律及在平板湍流边界层不同法向位置的作用。

**关键词:** 湍流边界层; 层析 TRPIV; 耗散尺度; 剪切尺度; 泰勒微分尺度; 积分尺度

## 引言

在湍流复杂的多尺度系统中<sup>[1]</sup>, 不同尺度结构的功能是不一样的。其中最大尺度与平均运动的特征尺度同量级, 用积分尺度作为其特征尺度。而耗散尺度表征了脉动中的最小尺度, 表示该尺度的脉动动能在分子粘性的作用下转化为热能。Taylor 微分尺度是对湍流的空间关联函数产生可识别影响的最小尺度涡的长度尺度。由于剪切湍流平均流场存在梯度, 在平均速度梯度的作用下, 产生的漩涡结构翻转的尺度定义为剪切尺度。尽管湍流中的结构是多尺度的, 但至今只用量纲分析的方法对湍流中不同尺度的结构进行尺度上的大致量级分析, 而对于湍流中不同时空尺度的测量及其在湍流系统中的功能进行还缺乏系统的定量研究<sup>[2]</sup>。姜楠等人用热线风速仪对湍流边界层中微小尺度流动结构的时间尺度进行了精细实验测量<sup>[3]</sup>, 研究了时间尺度沿平板湍流边界层法向位置的变化规律。

高速层析粒子成像测速技术 (Tomo-TRPIV) [4][5] 是新近发展起来的测量流体三分量三维 (3C-3D) 速度场的先进技术。它通过播撒粒子的流场的多角度瞬时图像定量重构粒子散射光强的三维分布, 运用三维互相关分析技术来确定粒子的位移和相应的三分量三维速度矢量。进行湍流中多尺度结构的特征尺度分析, 可以为湍流大涡模拟网格滤波尺度的选择和亚格子尺度模型的建立提供重要的依据。同时对于理解湍流的多尺度物理机理, 发展湍流理论, 建立符合湍流物理机理的工程湍流模式具有重要意义。本文利用层析 PIV 技术测量得到的平板湍流边界层速度矢量场空间分布数据库[6], 根据局部平均速度空间变形率的概念, 沿流向分解得到了平板湍流边界层速度场分尺度速度空间变形率。利用空间自相关方法得到了平板湍流边界层流向不同尺度湍涡的空间长度。研究了不同尺度的湍涡的空间特征长度随平板湍流边界层法向位置的变化规律以及湍涡的空间特征长度与耗散尺度、剪切尺度、泰勒微分尺度、积分尺度等典型特征尺度的关系。

## 1 实验设备、技术与基本流场

实验在低速水洞中进行, 在平行于来流, 垂直于底面的方向插入一块有机玻璃光滑平板, 获得自由来流速度为 0.53m/s 的湍流边界层。具体在参考文献[14]中详细介绍。图 1 给出了

用壁面摩擦速度无量纲化的半对数平均速度剖面。由于测量技术的限制，线性的粘性亚层没有被检测到，缓冲层 ( $y^+=13\sim28$ )、对数律层 ( $y^+=28\sim283$ ) 和尾流层 ( $y^+=283$  以后) 可以根据它们各自的特征曲率从速度剖面上分辨。实验第二步使用层析 PIV 系统以平板前缘下游 2090mm 处为中心，以 1kHz 的频率照亮 x、y 和 z 方向(x 为流向，y 为壁面法向)大小约为  $63\times15\times68\text{mm}^3$  的测量体，相当于  $1380\times328\times1490$  壁面单位。以 1kHz 的频率拍摄 2s 得到 2040 幅流动图像。用 DaVis7.3 软件和 MART 层析方法[12]，重构了三维粒子光强分布，得到了三维数字存储的光强的体素阵列，最后得到 1023 个瞬时三维速度场，每个瞬时三维速度场包含  $92\times99\times22$  (200,376) 个空间测量点，相邻测量点在每个空间方向步长 0.687mm，对应 15 个壁面粘性单位。

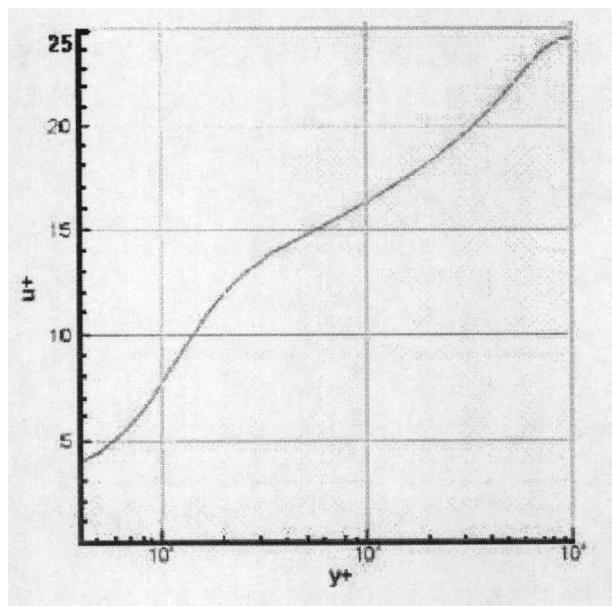


图 1 雷诺数为 2460 的观测位置处的湍流边界层剖面

## 2 数据分析与结果

X-Y 水平面内的平均速度为：

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^{Nx} \sum_{j=1}^{Ny} u(i, j, k)}{Nx \times Ny}, \quad \bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^{Nx} \sum_{j=1}^{Ny} v(i, j, k)}{Nx \times Ny}, \quad \bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^{Nx} \sum_{j=1}^{Ny} w(i, j, k)}{Nx \times Ny} \quad (2-1)$$

脉动速度为：

$$u' = u - \bar{u}, \quad v' = v - \bar{v}, \quad w' = w - \bar{w} \quad (2-2)$$

湍流耗散率：

$$\bar{\epsilon}(y^+) = \frac{\sum_{a=1}^{Nx} \sum_{b=1}^{Ny} \epsilon_s}{Nx \times Ny} \quad (2-3)$$

其中  $\varepsilon_s = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \varepsilon_{ij}$ ,  $\varepsilon_{ii} = \nu \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right)$ ,  $\nu$  为运动粘性系数。具体计算时用二次中心差分法求脉动速度各个方向的梯度。

通过量纲分析可以将 Kolmogorov 耗散尺度与平均能量耗散率联系起来:

$$\eta(y^+) = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon(y^+)} \right)^{1/4} \quad (2-4)$$

由于湍流边界层平均流场的非均匀性, 平均流场存在平均剪切率, 它是流向平均速度  $\overline{U(y^+)}$  沿法向  $y^+$  的梯度:

$$S(y^+) = \frac{\partial \overline{U}(y^+)}{\partial y^+} \quad (2-5)$$

根据文献[2], 可以用  $\bar{\varepsilon}(y^+)$  和  $S(y^+)$  定义剪切尺度  $L_s(y^+)$ :

$$L_s(y^+) = \left( \frac{\bar{\varepsilon}(y^+)}{S(y^+)^3} \right)^{1/2} \quad (2-6)$$

泰勒微分尺度定义如下:

$$\lambda = \left[ -f'(0) \right]^{-1/2} = \left[ \frac{r^2}{2(1-f(r))} \right]^{1/2} \quad (2-7)$$

$f(r) = \frac{(U(x+r) - \bar{U})(U(x) - \bar{U})}{(U(x) - \bar{U})^2}$   
其中  $f(r)$  是流向脉动速度的自相关系数。这里取速度  $U$  对应空间的三个分量  $u, v, w$  代入公式计算即可以得到空间三个方向上的泰勒微分尺度。

湍流积分尺度的计算公式如下:

$$L = \int_0^\infty f(r) dr \quad (2-8)$$

分别利用公式(2-4)、(2-6)、(2-7)、(2-8)沿一条流线计算, 并经过 99 条流线和 1023 个瞬时流场平均, 得到耗散尺度、剪切尺度、泰勒微分尺度、积分尺度, 用壁面内尺度粘性单位无量纲化, 如下图 2、3、4、5 所示。从图 2 发现, 平板湍流边界层中用粘性尺度无量纲化得到的耗散尺度在 3~4 壁面粘性单位之间, 并随法向位置缓慢增加。图 3 中, 平板湍流边界层中用粘性尺度无量纲化得到的剪切尺度比耗散尺度大一个量级, 在 40~100 壁面粘性单位之间。在对数律区随法向位置缓慢增大。图 4 给出流向、展向和法向三个速度分量的泰

勒微分尺度大约为 20~50 个壁面粘性单位。从图 5 中可以看见, 湍流边界层中用粘性尺度无量纲化积分尺度大致在 4000 壁面粘性单位的量级, 是平板湍流边界层中的最大尺度, 已不再随法向位置变化。

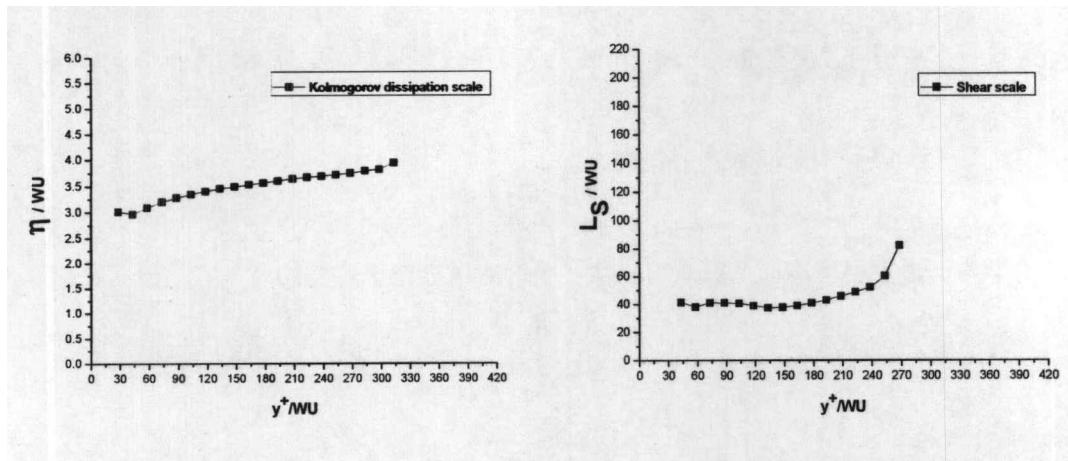


图 2 湍流边界层中用粘性尺度无量纲化耗散尺度与法向位置  $y^+$  的关系

图 3 湍流边界层中用粘性尺度无量纲化剪切尺度与法向位置  $y^+$  的关系

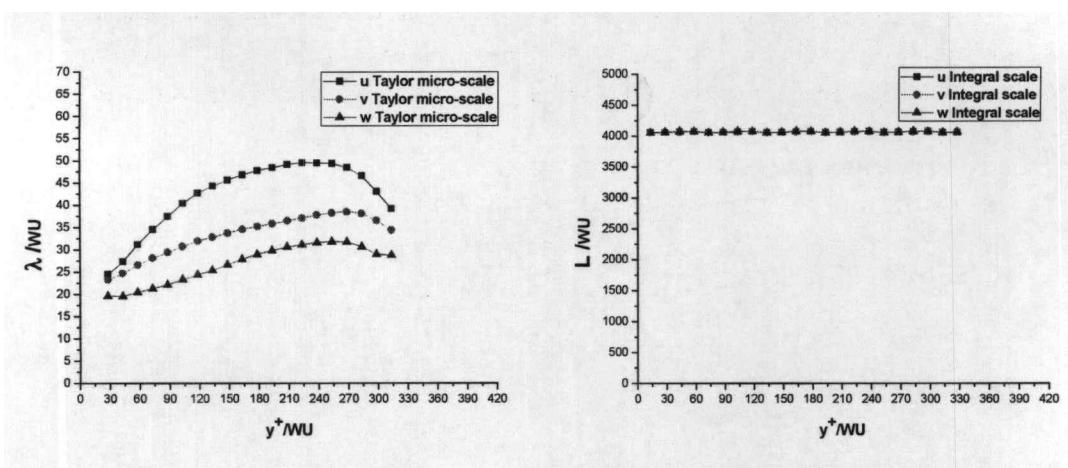


图 4 湍流边界层中用粘性尺度无量纲化泰勒微分尺度与法向位置  $y^+$  的关系

图 5 湍流边界层中用粘性尺度无量纲化积分尺度与法向位置  $y^+$  的关系

### 3 结论

本文使用平板湍流边界层 Tomo-TRPIV 数据库, 对低速水槽中零压力梯度平板湍流边界层中湍涡结构的流向空间尺度进行了定量研究, 得到了不同尺度湍涡结构的流向长度随平板湍流边界层法向的变化规律以及平板湍流边界层空间耗散尺度、剪切尺度、泰勒微分尺度、积分尺度随平板湍流边界层法向位置的变化规律, 得到如下结论:

平板湍流边界层中耗散尺度大约相当于 3~5 个壁面单位, 随法向位置缓慢增加, 它是湍流边界层中的最小尺度; 平板湍流边界层中剪切尺度比耗散尺度大一个量级, 大约 40~100

个壁面单位，代表由于平均速度梯度引起的湍涡展向旋转的直径，在靠近壁面的区域随法向位置变化不明显；泰勒微分尺度大约为 20~50 个壁面单位；湍流边界层积分尺度是平板湍流边界层中的最大尺度，大约相当于 4000 个壁面单位，是粘性耗散尺度的 1000 倍，不随法向变化。

## 参考文献

- 1 舒玮, 姜楠。湍流中涡的尺度分析[J], 空气动力学报, 2000, 18 卷, 增刊: 89~95 (Shu Wei, Jiang Nan, Eddy Scale Analysis in Turbulence[J], *Acta Aerodynamica Sinica*, 2000, 18, supplement: 89~95 (in Chinese))
- 2 LANDAU L.D., LIFSHITZ E.M., *Fluid Mechanics* [M], Pergamon Press, London. 1963.
- 3 姜楠, 王瑞新.湍流边界层中微小尺度流动结构的精细实验测量, 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27 (5): 644-648 (Jiang Nan, Wang Ruixin, Finely experimental measurement of micro-scale flow structures in turbulent boundary layer, *Journal of Harbin Engineering University*, 2006, 27 (5) :644-648(in Chinese))
- 4 Elsinga G.E., Scarano F., Wieneke B., and van Oudheusden B.W. (2006) Tomographic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 41:933-947(15)
- 5 Elsinga G.E., Wieneke B., Scarano F. and van Oudheusden B.W. (2005) Assessment of Tomo-PIV for three-dimensional flows; Proceedings of 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry Pasadena, California, USA, September 21-23, 2005
- 6 A.Schroder, R.Geisler, K.Staack , B.Wieneke, G.E.Elsinga, F.Scarano, A.Henning, Lagrangian and Eulerian views into a turbulent boundary layer flow using time-resolved tomographic PIV., 14th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, June 7-10, 2008,Lisbon (Portugal)